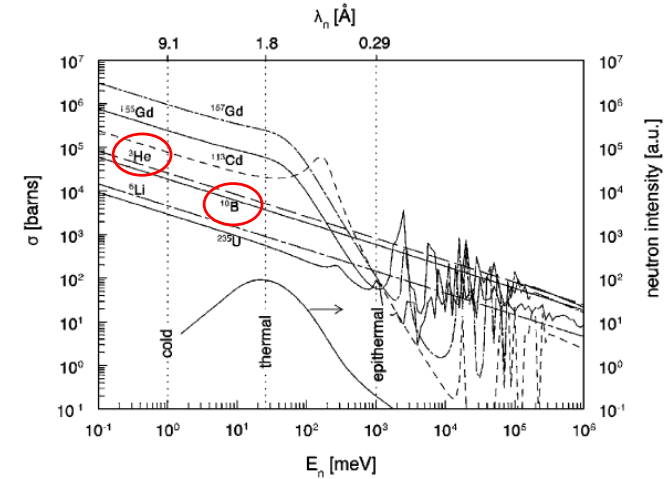
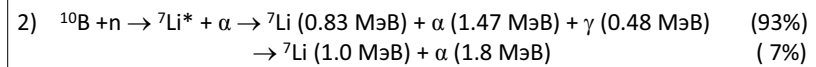


Газоразрядные детекторы нейтронов

1. Конверторы нейтронов и их характеристики
2. Параметры и состав рабочей газовой смеси
3. Базовые конструкции
4. Детекторы с твердотельными конверторами
5. Регистрация быстрых нейтронов



Реакции (n, p), (n, alpha) $\sigma \sim 1/v$



$\sigma = 3837 \text{ барн}$

Основные конверторы нейтронов и их параметры (для $\lambda = 1.8 \text{ \AA}$)

Изотоп	Агрегатное состояние	Сечение реакции, бн	Длина своб. проб.	Продукты реакции и их энергии (кэВ)		Пробеги продуктов реакции
				p: 573	T: 191	
${}^3\text{He}$	газ	5330		p: 573	T: 191	3.8 мм / атм. C_3H_8
${}^6\text{Li}$	тв.	940	230 мкм	T: 2727	α : 2055	130 мкм
${}^{10}\text{B}$	тв.	3840	20 мкм	α : 1472	${}^7\text{Li}$: 840	3 мкм
${}^{10}\text{BF}_3$	газ	3840		α : 1472	${}^7\text{Li}$: 840	4.2 мм / атм.
${}^{155}\text{Gd}$	тв.	49000	6.7 мкм	Конв. электроны: 39±199		12 мкм
${}^{157}\text{Gd}$	тв.	254000	1.3 мкм	Конв. электроны: 29±182		12 мкм

${}^3\text{He}$ - высокое сечение реакции, хорошие свойства с точки зрения газового усиления, очень дорогой и дефицитный. В промышленных масштабах производится только в России («МАЯК») и США.

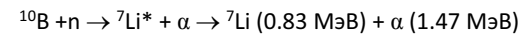
BF_3 - низкое сечение реакции, сильные электроотрицательные свойства (поглощает электроны), ядовитый и коррозионный, необходимо обогащение (естеств. бор: ${}^{10}\text{B}$ 20% + 80% ${}^{11}\text{B}$, обогащается до 96% ${}^{10}\text{B}$). В детекторах применяется относительно мало. Максимальное давление ограничено: сильное прилипание электронов + высокое напряжение.

Пространственное разрешение

• **Физический «лимит»** пространственного разрешения в основном обусловлен пробегами вторичных заряженных частиц



$N_T \sim 25000 \text{ пар (4 фКл)}$



• В He-3 детекторах образуются протон и тритон, имеющие достаточно большие энергии. Частицы разлетаются в противоположные стороны и ионизируют газ.

• Число первичных пар велико, поэтому **КГУ** обычно не более <400-500.

• В чистом He-3 при н.у. пробеги частиц велики ~ неск. см (протон ~45 мм, тритон ~10 мм).



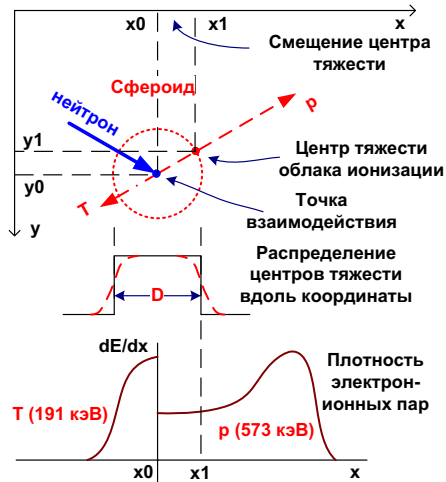
Снимок p-T треков в газе He3/CF4 сделан CCD-камерой

Т.е. при н.у. в He-3 длина трека $45 \pm 10 \text{ мм} = 55 \text{ мм}$. Для экспериментов надо 1.5-5 мм

Просто повесить давление в 10 раз сложно: дорогой газ, проблемы с «механикой» газового объема

Необходим дополнительный газ – имеющий высокие удельные потери энергии для заряженных частиц!

Пространственное разрешение – газовая смесь He3/CF4

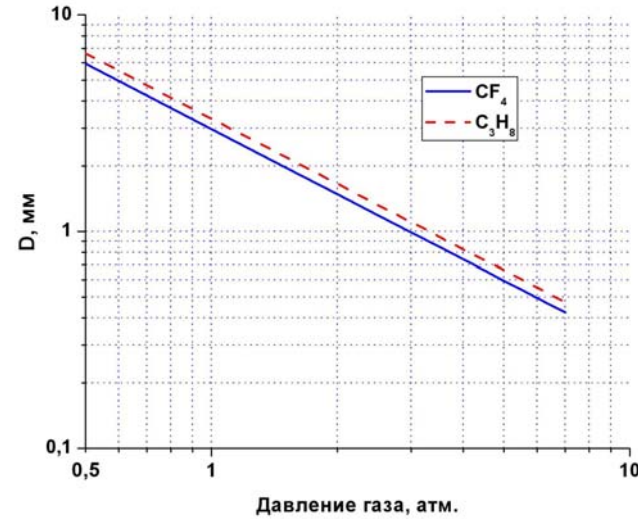


Точка конверсии нейтрона никогда не совпадает с центром тяжести облака первичной ионизации из-за различных ионизационных потерь и пробегов p и T :

$$D_{sph} = C \times R_p,$$

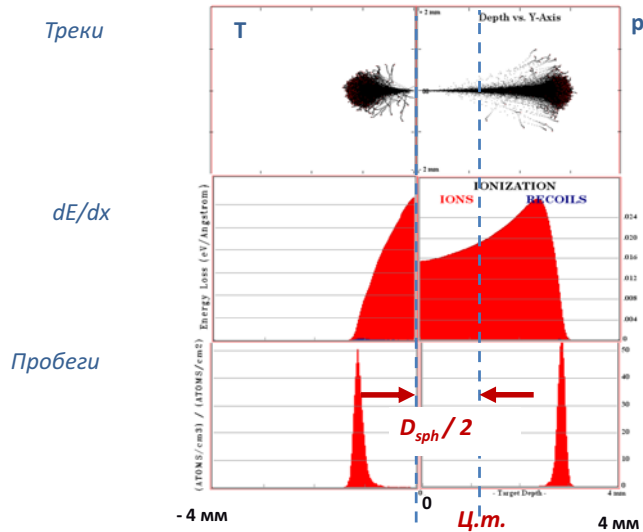
Диаметр сфероида – геометрическое положение центра тяжести зарядов бесконечного числа треков с началом в данной точке.
 R_p – пробег протона
 C – константа: 0.7 для CF_4 , 0.8 для C_3H_8

Диаметр сфероида – как функция давления «стоп-газов»



Для получения пространственного разрешения ~ 1 мм необходимо не менее 3-3.5 атм парциального давления «Стоп-газа» - газ с высоким dE/dx

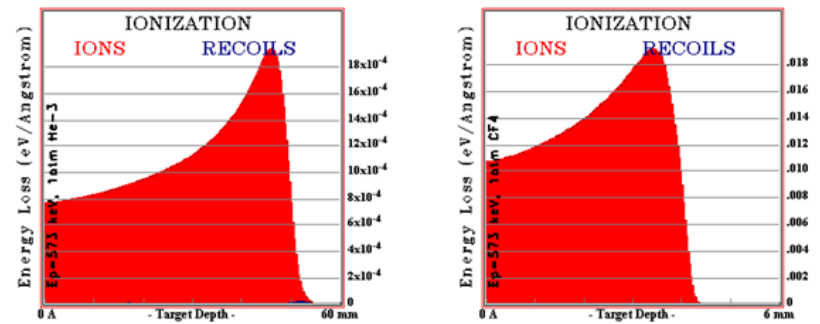
Треки и пробеги частиц (SRIM) газ CF4 1.5 атм.



Давление CF_4 1.5 атм.

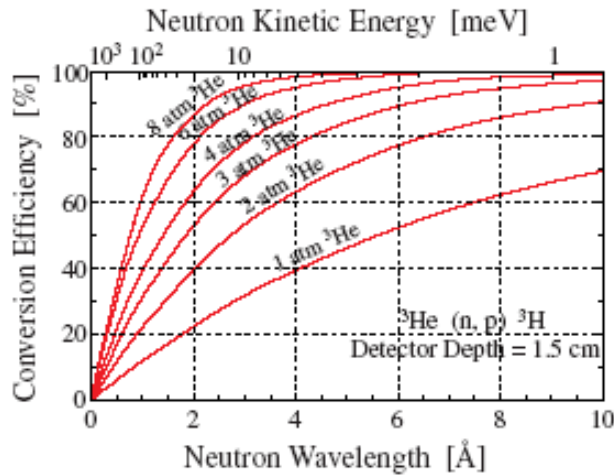
Работа стоп-газа CF_4

Ионизационные потери энергии протона с начальной энергией $E_p = 573$ кэВ в газе 3He (слева) и в газе CF_4 (справа) при н.у. (рассчитанные в программе SRIM).



Пробеги протона составляют $R_p(^3He) = 52.5$ мм и $R_p(CF_4) = 4.1$ мм соответственно. Т.е. отличаются в 10 раз!

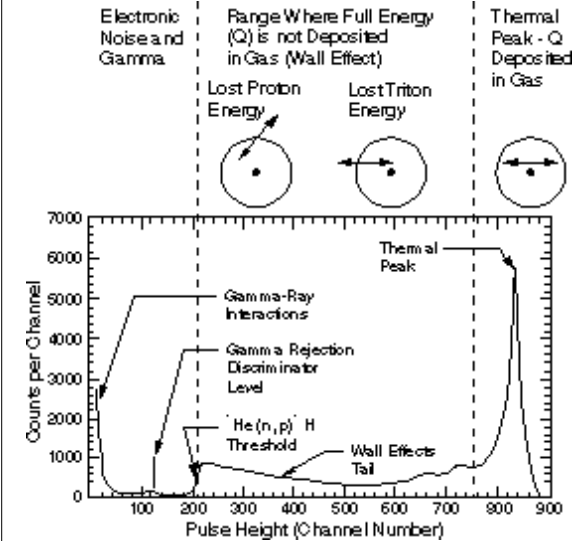
Эффективность регистрации



Давление He-3 газоконвертора в двухкоординатных детекторах (MWPC) обычно 1-6 атм.

Механический фактор – есть принципиальное ограничение для детекторов с большими площадями регистрации (от 0.5x0.5 м²), который не позволяет иметь одновременно высокую эффективность регистрации и высокое пространственное разрешение.

Структура амплитудного спектра



- Основной пик 764 кэВ
- Пик протона (тритон поглотился без образования e⁻/и пар) 573 кэВ
- Пик тритона (протон поглотился)
- «Стеночный» эффект – частичное поглощение (потери первичных зарядов)
- Шумы электроники, микроразряды (ВВ шум), гаммафон

Структура спектров позволяет четко отделить фоновые события (реакторные гамма-кванты, шум детектора)

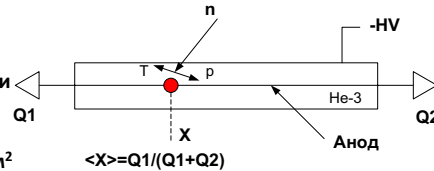
Низкая чувствительность к гамма-излучению 10⁻⁷-10⁻⁸, существенно меньше чем для любого другого конвертора тв/жидк. фазы

Это очень ценное качество газоразрядных детекторов – большой динамический диапазон – существенно при измерениях на слаборассеивающих образцах.

Одно/двухкоординатные газовые детекторы тепловых нейтронов

2D-системы из пропорциональных счетчиков

- Длина 1м и более, диаметр 10-50 мм
- Метод деления заряда для линейной чувствительности (PSPC): высокорезистивный анод Ni-Cr (Reuter-Stokes) FWHM ~ 1% * L, где L – длина анода
- Большая площадь покрытия мультidetекторов: 1-30 м²
- Локальная скорость счета ~ кГц/мм²
- Стоимость в 2 раза ниже MWPC



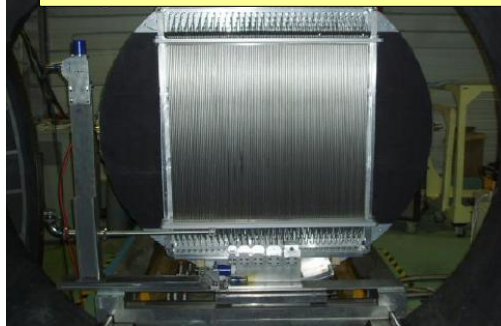
128 PSPC чувствительная область 1 м².
Метод деления заряда, макс. загр. 5Мгц
Диам. сч.: 8 мм. Давление: 15 бар
Эффективность: 75 % (5 А)

Минусы:

- Пространственное разрешение вдоль сборки ограничено диаметром счетчика > 6 мм

Детекторные системы, состоящие из пропорциональных счетчиков, зачастую являются единственным оптимальным решением при необходимости регистрации нейтронов на больших площадях до 20-30 м²

SANS D22, ILL



n-ToF spectrometer IN5, ILL



32 PSPC в модуле, длина 3 м
Площадь: 30 м²
Диам. сч.: 25.4 мм
Давление: 5 бар
Угол покрытия: 148°

Large Chalk River BF₃ Proportional Counter



• Пропорциональный счетчик использовался в лаб. Deep River Neutron Monitoring Station для исследований космического излучения. Длина 183 см, наполнен газом BF₃. Помещался в парафин для замедления быстрых нейтронов космического излучения.

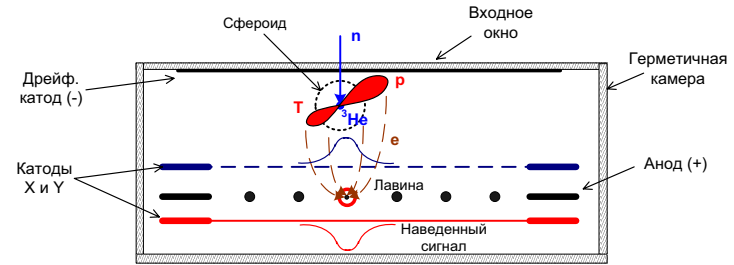
Chalk River publications 1961 Solar Geophysical Data, Part B, CRPL-F-204 and 205 by Steljes, J.F. and Carmichael, H.

• Детектор на рис. прототип счетчика NM-64 (neutron monitor 1964) – международный стандарт для мониторинга нейтронного космического излучения. Разработан Хью Кармайклом в Chalk River Laboratory.

Характеристики счетчика NM-64:

- Материал стенок (катод): нерж. сталь с медным покрытием
- Чувств. длина: 183 см
- Внутренний диаметр: 14.5 см
- Газ: BF₃, обогащение В-10 - 96%
- Давление: 18.5 мм рт. ст.
- Объем: 33 л
- Объем газа BF₃: 8.04 л (при н.у.)

MWPC – традиционная конструкция He-3 1D/2D-систем



- Дрейфовый промежуток – конвертация нейтронов - эффективность регистрации
- Пропорциональный промежуток – усиление первичной ионизации и локализация е-лавины

MWPC – более гибкая конструкция газоразрядного детектора нейтронов:

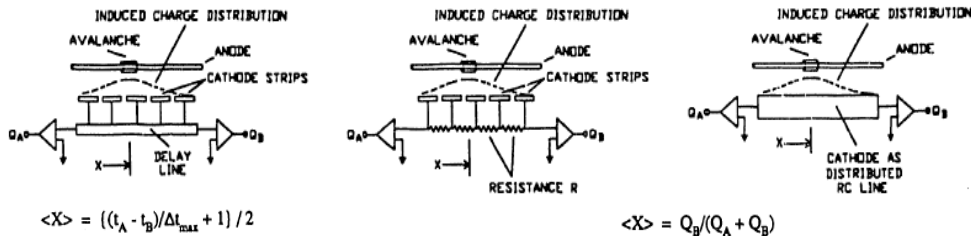
- Диапазон по площадям 5x5 см² до 1x1 м²
- Методы съема: интерполяционные (LC, RC – линии задержки), метод деления заряда, поканальный метод



Очень популярны, но к сожалению характеристики ограничены возможностями MWPC: скорость счета, нестабильность проволочек и др.

- Достижение высокой эффективности регистрации и пространственного разрешения связано с необходимостью использования газовой смеси при высоком давлении (обычно ≤4-6 атм.). Поэтому обычно пространственное разрешение обычно составляет $FWHM \geq (0.005 \div 0.008) \times l$, где l – линейный размер чувствительной области детектора.

Методы считывания и восстановления координаты – интерполяционные методы



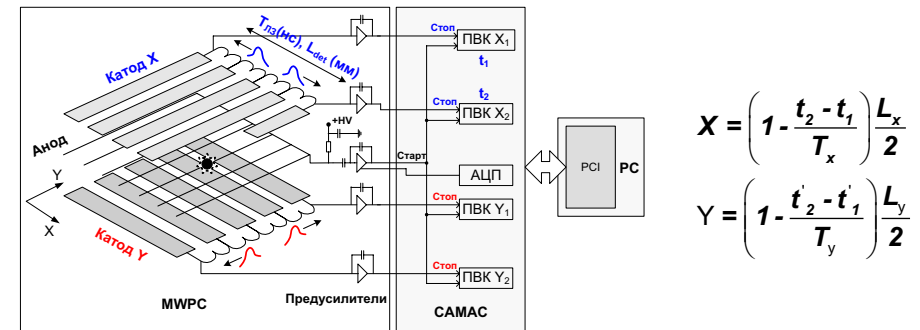
$$\langle X \rangle = ((t_A - t_B) / \Delta t_{max} + 1) / 2$$

Сравнение времен прихода двух сигналов от каждого события на ПУ

$$\langle X \rangle = Q_B / (Q_A + Q_B)$$

Сравнение величин собираемых сигналов на ПУ от каждого события

Метод съема сигналов на LC-линию задержки



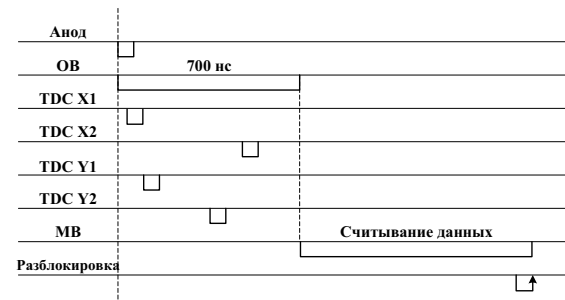
$$X = \left(1 - \frac{t_2 - t_1}{T_x} \right) \frac{L_x}{2}$$

$$Y = \left(1 - \frac{t_2 - t_1}{T_y} \right) \frac{L_y}{2}$$

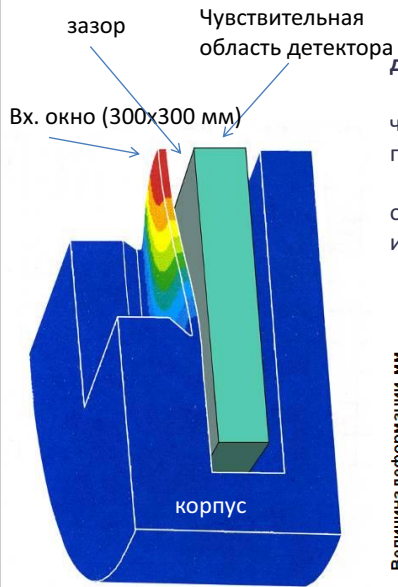
Теоретическое временное разрешение двух событий - минимальное время следования двух событий

$$T_{x,y} < 1 \text{ мкс}$$

Событием является наличие анодного сигнала и 4-х катодных во временных воротах OB



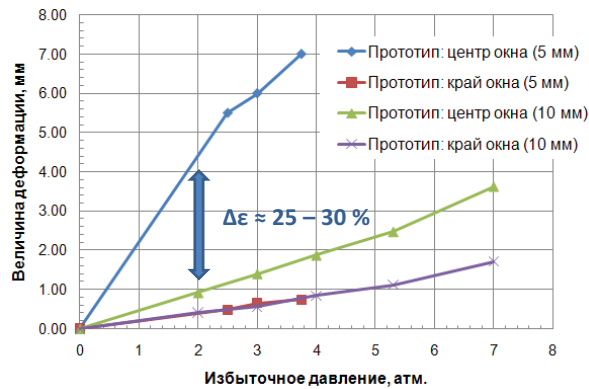
Механический фактор – пример: MWPC (прототип ПИЯФ)



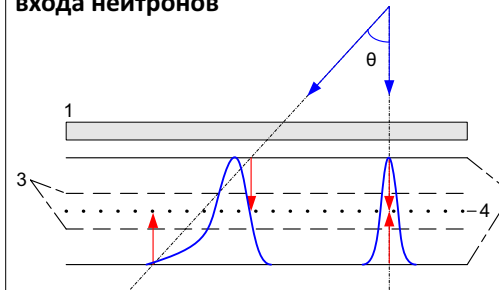
ANSYS 8.1 (МКЭ),
ЦНИИ им. акад.
А.Н.Крылова, СПб

Избыточное внутреннее давление приводит к деформации входного окна детектора:

- 1) Нарушается расстояние m/γ вх. окном и чувствительной областью – неоднородность поглощения (эффективности) по площади
- 2) Если зазора нет (дрейфовый электрод на окне), то возникает неоднородность поглощения и искажение поля в дрейфовом промежутке.

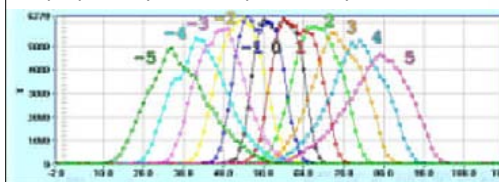


Проблема параллакса - зависимость пространственного разрешения от угла входа нейтронов



1 – входное окно, 2 – дрейфовые катоды, 3 – стрипы катодов X и Y, 4 – анод, θ – угол падения нейтронов. Кривые, обозначенные синим цветом, соответствуют наблюдаемым профилям пучка, стрелки в объеме детектора обозначают линии дрейфа 2 электронов к плоскости анода.

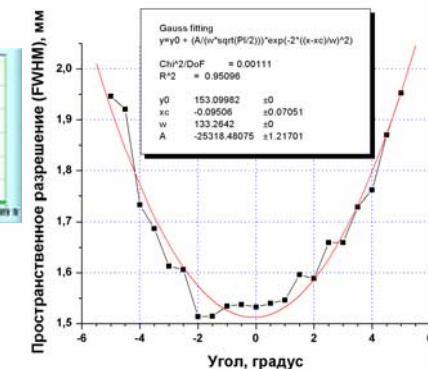
Профиль пучка нейтронов от угла падения



Уменьшить эффект можно:

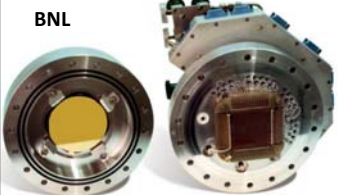
- 1) Оптимизация толщины детектора
- 2) «banana-like» детекторы для широко-угольной дифракции WANS

Угловое разрешение детектора на дифрактометре «Вектор», ФГБУ ПИЯФ



MWPC: примеры

- Площадь: $5 \times 5 \text{ м}^2 - 1 \times 1 \text{ м}^2$
- Метод съема сигналов: поканальный, ЛЗ, метод деления заряда
- Простр. разрешение 1-5 мм (до 0.4 мм)
- Эффективность 50-90% (1-4 Å)
- Временное разрешение ~1 мкс (TOF)



Детектор с входным окном $5 \text{ м} \times 5 \text{ м}$, пространственное разрешение $0.4 \times 0.4 \text{ м}^2$, 8 атм. $^3\text{He} + \text{батм. } \text{C}_3\text{H}_8$

Детектор 21000N ORDELA с входным окном $1 \text{ м} \times 1 \text{ м}$, временное разрешение 3 мкс, интегральная нагрузка 200 кГц, пространственное разрешение $5.1 \times 5.1 \text{ м}^2$, эффективность 50%–80% (2-5 Å)

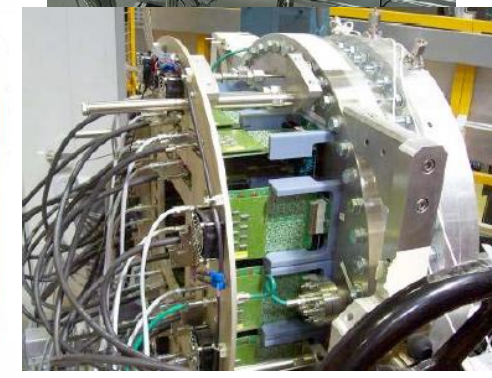
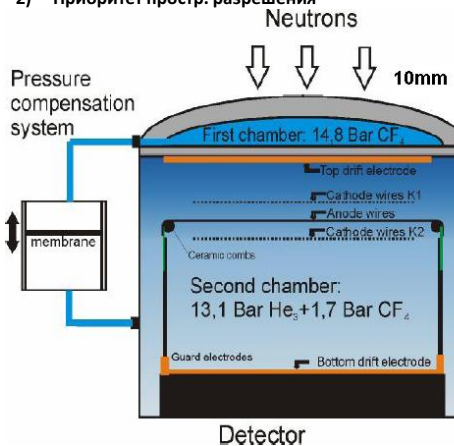
Изогнутый 120°-детектор для кристаллографии протеннов, чувствительная площадь $1.5 \text{ м} \times 20 \text{ см}$, временное разрешение 1 мкс, интегральная нагрузка 1 МГц, пространственное разрешение 1.5 мм, эффективность >50% (1 Å)



MILAND project (MWPC, MSGC, SGPC) for SXD&Reflect

- MWPC: 320ммx320мм, 15 бар Ne_3/CF_4
- Макс. скорость счета ~1 МГц (10%)
- Простр. разрешение ~1.2 мм
- Эффективность >70% (2.5Å)
- $n/\gamma: 10^{-8}$ (Co-60)
- frontend: <1 мкс
- 640-канальный readout (ASIC)

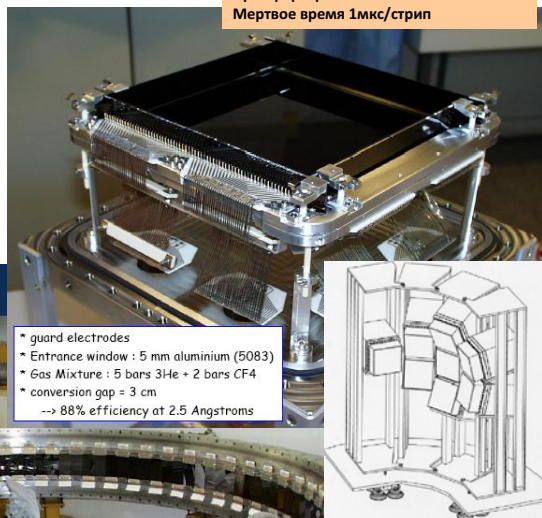
- 2 режима работы детектора:
- 1) Приоритет эффективности
 - 2) Приоритет простр. разрешения



Микроструктуры - MSGC

- Скорость счета до 1МГц/мм² (VCC)
 - До 100кГц/стрип (frontend dead time 1мкс)
 - Пространственное разрешение 1-3 мм (до 0.5мм)
 - Эффективность <60-90% (1 A)
 - вариации readout катода
 - однородность эффективности (нет "болезней" MWPC)
- Очень требовательны к чистоте газа**
- Сложность обработки - лимит 250 мм x 250 мм
 - высокая стоимость

VIDIM200 (VCC): 192ммx192мм
Покальный съем 64x64
Простр. разрешение 3 мм
Мертвое время 1мкс/стрип



D20 powder diffractometer (since Feb 2000)
1D localisation
48 MSGC plates (8 cm x 15 cm)
Angular coverage : 160° x 5.8°
Position resolution : 2.57 mm (0,1°)
5 cm gap; 1.2 bar CF4 + 2.8 bars 3He
Efficiency 60% @ 0.8 Å

* guard electrodes
* Entrance window : 5 mm aluminium (5083)
* Gas Mixture : 5 bars 3He + 2 bars CF4
* conversion gap = 3 cm
--> 88% efficiency at 2.5 Angstroms



Детекторы с He-3 конвертором

- Высокая эффективность и пространственное разрешение достигаются только при высоком давлении газа => компромисс между размерами детектора и его основными характеристиками

- Сложно получить пространственное разрешение FWHM<1мм

+ Низкая чувствительность к гамма-излучению

- Наличие параллакса – зависимость пространственного разрешения от угла падения нейтрона

- Высокая стоимость газа ³He

- Проблема утечек He-3, чистота газовой смеси!

• **Пропорциональные счетчики (1D, 2D):** большие чувствительные площади (1м² - неск. дес.м²), невысокая скорость счета (~100кГц) при относительно простой регистрирующей электронике

• **Микроструктурные детекторы:** малая чувствительная область (до 30см x 30см), возможность работы при высоких локальных нагрузках, многоканальная электроника, повышенные требования к чистоте газовой смеси и выбору материалов (MSGC)

Типовые характеристики детекторов с He-3 конвертором:

- высокая эффективность регистрации 50-90% (1-4 Å)
 - чувствительность к гамма-излучению 10⁻⁷-10⁻⁸
 - пространственное разрешение FWHM ≥ 1 мм
 - временное разрешение ~1 мкс
 - толщина чувствительной области 20-30мм
-
- необходимо высокое давление газовой смеси
 - всегда есть пространственные ошибки, связанные с параллаксом (исключение – изогнутые детекторы)

He-3 детекторы, например, пропорциональные счетчики легко приспособить для регистрации быстрых нейтронов путем помещения счетчика в материал-замедлитель (парафин, полиэтилен и т.п.)

Газоразрядные детекторы с твердотельными конверторами (гибриды)

Основные проблемы детекторов с газовыми конверторами нейтронов - необходимость использования рабочего газа под высоким давлением для одновременного достижения высокой эффективности регистрации и высокого пространственного разрешения.

Высокое давление рабочей смеси из-за механических деформаций детектора ограничивает возможность изготовления детекторов с большой чувствительной площадью.

Необходимость высокого давления газа-конвертора отпадает при использовании твердотельных конверторов нейтронов.

Наиболее популярные конверторы ¹⁰B, ¹⁵⁵Gd, ¹⁵⁷Gd. Конверсия нейтронов осуществляется в тонком слое конвертора, и продукты реакции регистрируются в детекторе при низком давлении газовой смеси.

Характеристики твердотельных конверторов нейтронов

Твердотельные конверторы (${}^6\text{Li}$, ${}^{10}\text{B}$, ${}^{157}\text{Gd}$) характеризуются величиной R/λ_n – отношение длины пробега вторичных частиц к длине своб. пробега нейтрона данной энергии в конверторе.

-> оптимальная толщина конвертора обеспечивает наиб. эффективность регистрации для данной длины волны нейтронов.

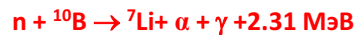
Длина свободного пробега нейтрона λ_n – определяет необходимую толщину материала

Например, в конверторах, содержащих ${}^6\text{Li}$ и ${}^{10}\text{B}$, образуются вторичные частицы с энергиями ~ МэВ

• (Т, α)	$R_T=130 \mu\text{m}$	$\lambda_n=230 \mu\text{m}$	=> $R/\lambda_n=0.56$
• (α , ${}^7\text{Li}$)	$R_\alpha=3.14 \mu\text{m}$	$\lambda_n=19.9 \mu\text{m}$	=> $R/\lambda_n=0.16$

Поэтому невысока эффективность (5-15%) для тепловых нейтронов монослойных ${}^6\text{Li}$ и ${}^{10}\text{B}$ конверторов.

Газонаполненные детекторы с борными твердотельными конверторами



Пропорциональный счетчик с борным конвертором, нанесенным на внутреннюю поверхность металлической трубки (сталь, ...)



• Характеристики счетчика Reuter Stokes

- 1 слой конвертора карбид бора B_4C -> $\epsilon=5\%$
- Газовая смесь Ar/CO_2 , $P=20 \text{ см.рт.ст.}$
- Длина счетчика до 2.2 м
- высокая степень разделения n/γ (до 100мр/ч)
- Информация: амплитуда, счет, координата вдоль проволочки (charge division на высокорезистивном аноде - NiCr)
- пространственное разрешение вдоль проволочки до 1 % от длины

$\text{B } {}^{157}\text{Gd}$ – вторичные частицы – изотропное излучение конверсионных электронов (CE) с энергиями в диапазоне 29-182 кэВ. Вероятность появления CE 87.3%

$\lambda_{\text{ce}}/\lambda_n=9.1$ эффективность при *оптимальной толщине* конвертора до 60% для тепловых нейтронов и при регистрации каждого конверсионного электрона (малая часть событий – 2 конверсионных электрона).

Отношение $\lambda_{\text{ce}}/\lambda_n$ для ${}^{157}\text{Gd}$ существенно больше чем отношение R/λ для ${}^6\text{Li}$ и ${}^{10}\text{B}$, поэтому более эффективен.

Максимальная эффективность достигается если:

- 1) Регистрируются конверсионные электроны с обеих плоскостей слоя конвертора (излученные вперед и назад)
- 2) Толщина слоя оптимизирована для данной длины волны нейтронов: оптимум между поглощением нейтронов и выходом электронов

Например,

${}^{157}\text{Gd}$ оптимальная толщина $\approx 3 \mu\text{m}$ для $\lambda=1.8 \text{ \AA}$

$\lambda_{\text{ce}}/\lambda_n=9.1$

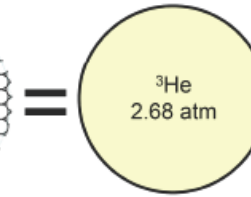
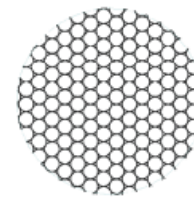
$\lambda_{\text{ce}}=11.9 \pm 0.6 \mu\text{m}$ средняя свободная длина пробега вторичных электронов

$\lambda_n=1.3 \mu\text{m}$ длина свободного пробега нейтронов с длиной волны $\lambda=1.8 \text{ \AA}$ в ${}^{157}\text{Gd}$

Технология Straw

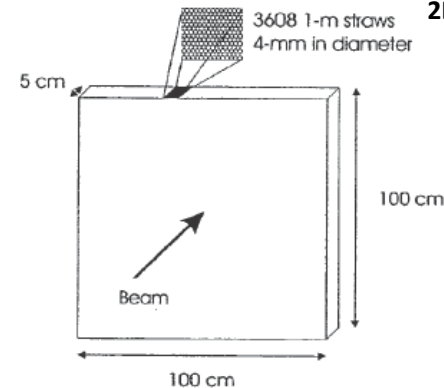
~143 straws lined with 1 μm of ${}^{10}\text{B}_4\text{C}$

5-cm diameter ${}^3\text{He}$ tube



Straw – тонкостенный (каптон, медь, алюминий) пропорциональный счетчик.

Диаметр около 4-6 мм.



2D-система на straw-технологии

- $\epsilon=65\%$ (5см)
- X – номер straw
- Y – charge division

Патент
J.L.Lacy, 2006
US007002159B2

2D -детектор нейтронов по технологии straw с продувом газовой смеси

Proportional technologies Inc, USA

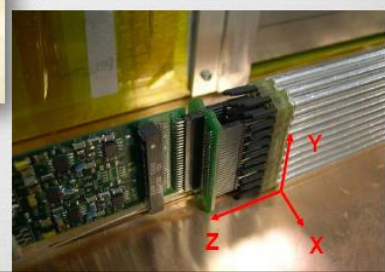
Детектор:

- 1м x 1м, состоит из 22 модулей
- Модуль: пакет 5x10 straw, внутри покрытых карбидом бора
- straw – длина 1м, диам. 4мм
- Газовая смесь Ar/CO₂ (90/10) непрерывно продувается через детектор



Электроника:

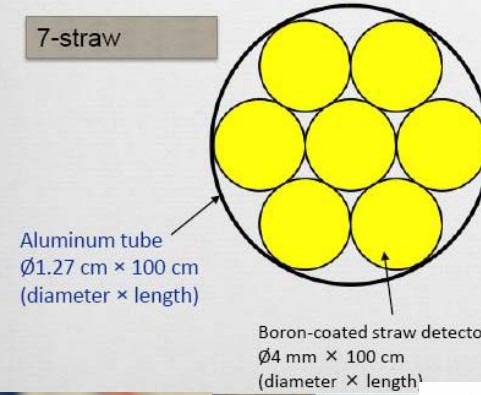
- На каждый катод straw подается отрицательное напряжение
- сигналы с каждого анода поступают на электронику (X,Y каждого события)
- Методом деления заряда определяют координату Z



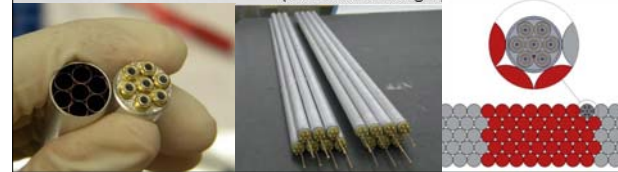
Straw-технология можно адаптировать и для использования детектора в вакууме (SANS)

Каждый счетчик герметичен и наполнен газовой смесью Ar/CO₂ при н.у.

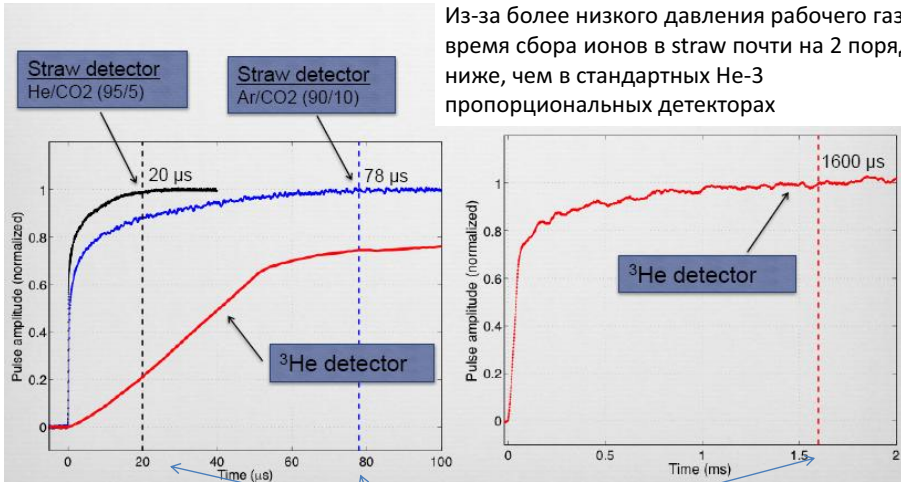
7-straw



Number of straws	Neutron Detection Efficiency (thermal), %	Neutron Sensitivity (thermal), cps/nv
7	18.4	23.4
19	26.6	56.4
37	33.3	98.9
61	38.8	148
91	43.3	202



Сравнение временных характеристик He-3 и борных (straw) детекторов

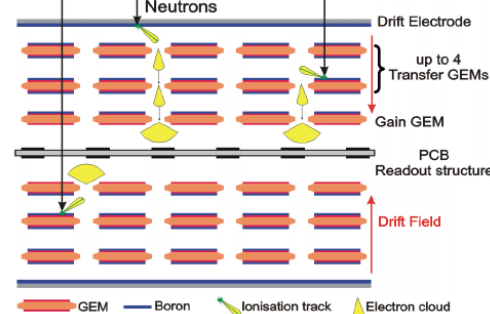
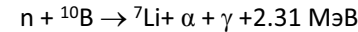


Из-за более низкого давления рабочего газа время сбора ионов в straw почти на 2 порядка ниже, чем в стандартных He-3 пропорциональных детекторах

Время сбора полного заряда

Газонаполненные детекторы с твердотельными конверторами на основе GEM

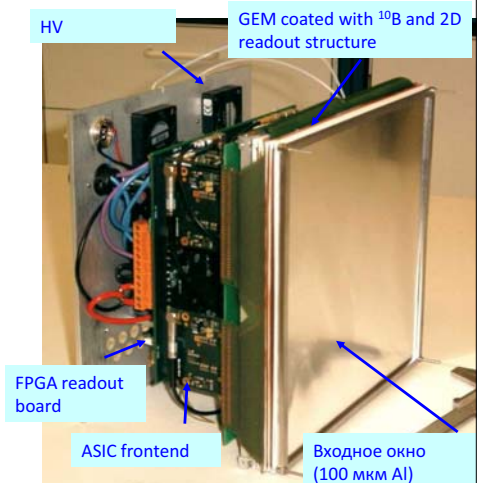
CASCADE (DETNI)



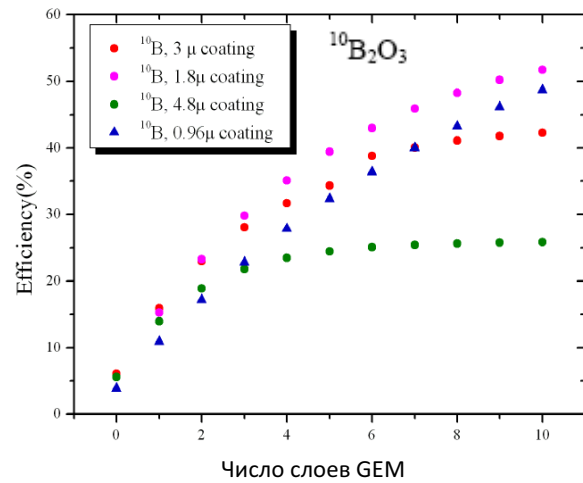
- FWHM ~ 3.1 мм (при н.у.) (прототип)
- FWHM ~ 1 мм (при +1.5 бар. CF₄)
- 10 слоев GEM – эфф. 50% (1.8 A)
- 4 МГц (прототип)
- Газовая смесь 90%Ar+CO₂ при н.у.
- Readout: strip, рад...
- радиационная стойкость:
 - 1) поток нейтронов ↑ 600МГц/см² (2.2 см², T=2.5 часа) 2) ↓ потока до н.у., нет снижения КГУ

High resol. SXD& reflectometry& SANS:

- чувствительная область 30x30см²
- скорость счета 10МГц
- FWHM=1 мм



Эффективность детектора с оксидом бора (нейтроны 1.8 А)



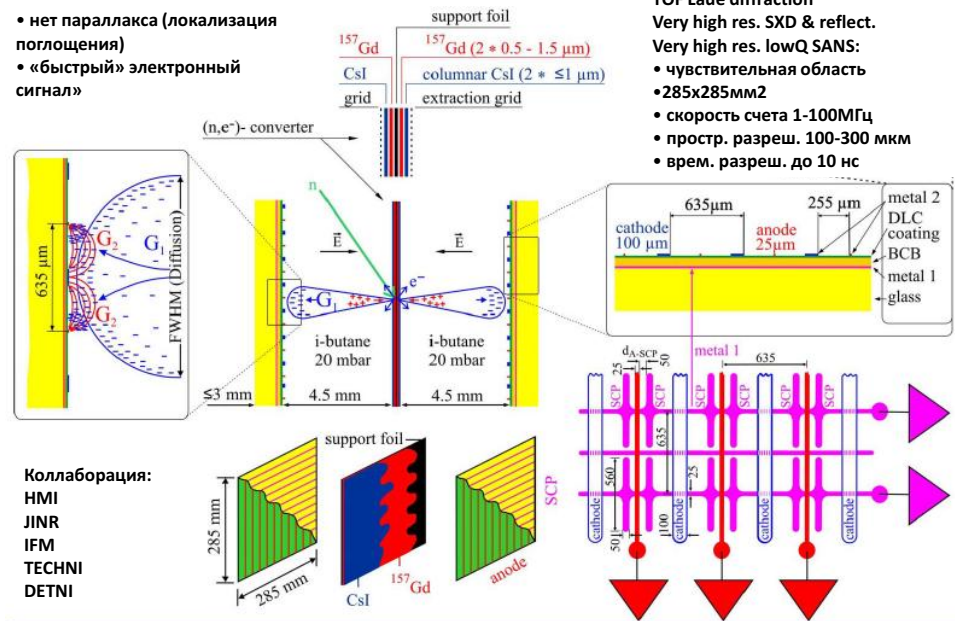
Что необходимо учитывать:

GEM: основа - полиамидная пленка – содержит водород, т.е. рост количества слоев приводит к росту числа нейтронов, рассеянных на самом детекторе – плохо!

Газонаполненные детекторы с твердотельными конверторами на основе MSGC

Gd Low-Pressure MSGC (DETNI)

- нет параллакса (локализация поглощения)
- «быстрый» электронный сигнал»



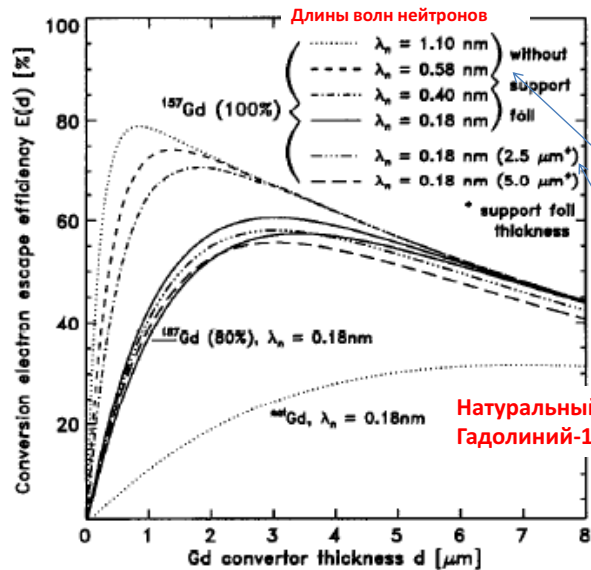
TOF Laue diffraction
Very high res. SXD & reflect.
Very high res. lowQ SANS:
• чувствительная область
• 285x285мм2
• скорость счета 1-100МГц
• пространств. разреш. 100-300 мкм
• время разреш. до 10 нс

Коллаборация:
HMI
JINR
IFM
TECHNI
DETNI

Составной конвертер $^{157}\text{Gd}/\text{CsI}$

Конвертер Гадолиний-157 (1-3 мкм): тепловой нейтрон -> конверсионный электрон 30-180 кэВ

Эмиттер вторичных электронов Йодид цезия (0.5-1 мкм) : конверсионный электрон -> компактный (~0.1- 1 мкм) кластер (в среднем 10 шт) медленных вторичных электронов 1эВ



Эффективность выхода конверсионных электронов из Gd-157

Без поддерживающей фольги

С фольгой

Максимумы кривых – соответствуют оптимальным толщинам конвертера для данной длины волны

Особенности газового усиления в детекторе низкого давления

- Камера заполнена изобутаном при низком давлении (20 мбар).
- Изобутан – эффективный гаситель вторичных лавин, позволяет работать при высоких отношениях E/p (напряженность поля, давление газа) и достигнуть необходимого газового усиления

Усиление происходит в три стадии:

- 1) Промежуток конвертер – сетка (G1)**, вытягивающая первичные электроны (extraction grid)
Зазор 250 мкм, напряженность поля E/p = 250-500 В/(см мбар)
Ионизационная длина своб. пробега ~50 мкм -> **усиление электронов начинается практически у поверхности конвертора:** - синхронность прихода электронов, -параллакс практически отсутствует
- 2) Область сетка- микроstriпы (G2)** (~0.5 над MSGC) – область плоского поля E/p = 100 В/(см мбар). Достигают ~ 50% электронов (диффузия, рассеяние)
- 3) Микроstriповый детектор (G3)**

Если событие не обусловлено захватом нейтрона (гамма-фон), его амплитуда практически всегда будет меньше «нейтронного события» ($G1 \times G2 \times G3 \sim 10^4$), поэтому его легко режектировать по амплитуде.

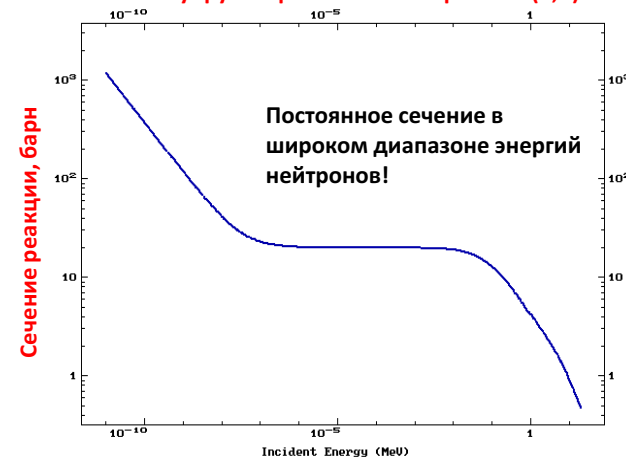
Газоразрядные детекторы с твердотельными конверторами

- Высокая эффективность: Гадолиний-157, многослойные конструкции на основе (Бор-10)
- Пространственное разрешение $FWHM < 1 \text{ мм}$ можно получить на Gd в сочетании с конвертером конверсионных электронов (Csi), для других конверторов необходимо повышать давление рабочего газа (пробеги вторичных частиц)
- Высокие временные характеристики в микроструктурных детекторах (газ при н.у. или в разреженном состоянии)
- Чувствительность к гамма-излучению зависит от толщины конвертора и Z: высока для Gd
- Возможны беспараллаксные конструкции – конвертор в центр. плоскости (Gd)
- Относительно низкая стоимость конвертора, дешевый рабочий газ
- Необходима высокая чистота газовой смеси в микроструктурных детекторах!
- Однородность и равномерность нанесения – ключевое требование!

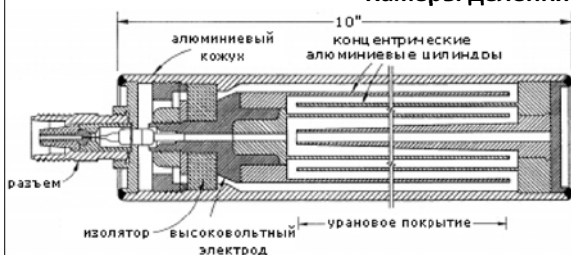
Регистрация быстрых нейтронов

- 1) Замедление быстрых нейтронов с последующей их регистрацией борными или гелиевыми счетчиками
- 2) Камеры деления (медленные и быстрые нейтроны)
- 3) Протоны отдачи – реакция $n + p \rightarrow n + p'$. Протоны отдачи ионизируют газ. Обычно смеси с большим содержанием водорода Ar/CH_4 , Размер счетчика $\sim 10 \text{ см}$ и более из-за пробегов вторичных протонов.

Сечение упругого рассеяния нейтронов $\text{N}(n,n)\text{N}'$

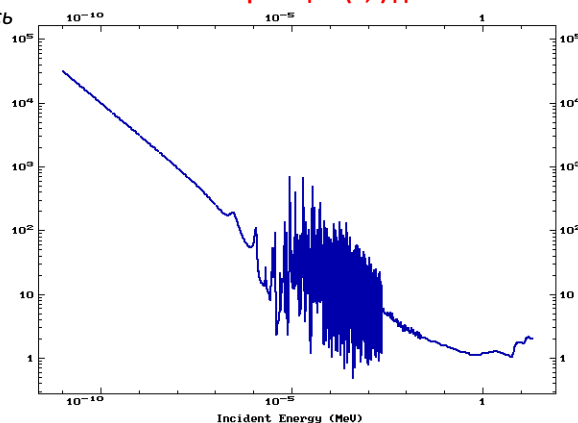


Камеры деления



Внутреннюю поверхность ионизационной камеры покрывают тонким слоем делящегося вещества: ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu , ^{232}Th .

Сечение реакции (n,f) для ^{235}U



Внутри камеры – аргон или смесь

Высокоэнергетичные осколки деления вызывают большую ионизацию в газе и имеют большую амплитуду.

Эффективность регистрации в однослойной камере деления - доли процента, поэтому часто применяют многослойные конструкции камер

• Деление некоторых изотопов: ^{232}Th , ^{238}U , ^{232}Pa , ^{237}Np реакция деления начинается с некоторой **пороговой энергии**

• Сечение пороговой реакции резко увеличивается с ростом энергии и выше **пороговой энергии** становится почти постоянной

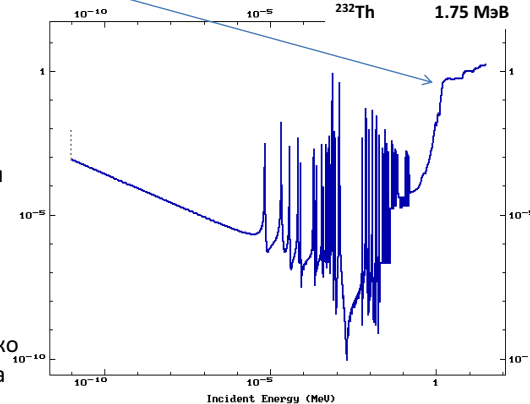
• Камеры деления, в которые вводят вещества с порогом деления по энергии нейтронов, называют **пороговыми камерами деления**

• Камеры деления обычно работают в **импульсном режиме**:
Путем амплитудной дискриминации легко исключить γ -фон, т. к. импульс от осколка деления \gg амплитуды импульса от γ -кванта

• Камера деления позволяет измерять потоки нейтронов на **сильном фоне γ -излучения**

Применение: измерение потоков быстрых нейтронов в системах управления ядерными реакторами, контроль уровня мощности при включении и выключении ядерного реактора (в эти интервалы времени потоки γ -квантов в ядерном реакторе намного превосходят потоки нейтронов)

^{237}Np	0.75 МэВ
^{232}Pa	0.5 МэВ
^{238}U	1.45 МэВ
^{232}Th	1.75 МэВ



Регистрация быстрых нейтронов при их замедлении

• При рассеянии нейтрона на ядре с массовым числом A средняя потеря энергии определяется соотношением

$$E_1 = (1 - a/2) E_0, \quad a = 4A/(A+1)^2 \quad \text{Если замедлитель углерод } ^{12}\text{C}, \text{ то } E_1 \sim 0.8 \times E_0$$

• Замедление идёт тем эффективнее, чем легче ядра замедлителя.

Например, после столкновения протон и нейтрон имеют одинаковые энергии (т.к. их массы равны):

$$E_1 = E_n = E_p = E_0/2$$

E_1 – средняя энергия нейтрона после столкновения, E_0 - до столкновения

• **Длина замедления $T(\text{см}^2)$** - среднеквадратичное расстояние, на которое нейтрон уходит от источника в процессе замедления в интервале энергий от 1 МэВ до 1 эВ.

• Начиная с энергий 0.5 - 1 эВ при столкновениях нейтронов с ядрами становится существенной тепловая энергия атомов.

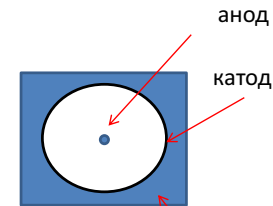
Распределение нейтронов начинает стремиться к равновесному, т.е. максвелловскому – **процесс термализации**.

Замедлители	$T(\text{см}^2)$	$L(\text{см})$
H_2O (вода)	31	2.72
D_2O (тяжёлая вода)	125	159
Be (бериллий)	86	21
C (графит)	313	58

Кроме того, от хорошего замедлителя требуется: слабое поглощение нейтронов (малое сечение поглощения)

Например, сечения поглощения нейтронов малы для дейтерия и кислорода, поэтому хороший замедлитель тяжёлая вода D_2O . Чуть хуже вода H_2O , углерод, бериллий, двуокись бериллия.

Регистрация б.н. пропорциональным счетчиком



Парафин/полиэтилен - замедлитель

Счетчики:

He-3, либо покрытия с содержанием В-10 (1 мг/см²) или U-235 (1 мг/см²)